

# Identificación de restos de explosivos de guerra mediante análisis multiespectral de anomalías RX y detección de blancos

REVISTA **MAPPING**  
Vol. 29, 204, 4-13  
2021  
ISSN: 1131-9100

*Identification of explosive remnants of war by multispectral analysis of RX anomalies and target detection*

Gonzalo Escobar Arévalo

## Resumen

El presente trabajo pretende contribuir al desarrollo de una estrategia metodológica con herramientas de teledetección, que permita identificar las zonas con presencia de explosivos remanentes de guerra (REG). Para ello se han realizado análisis desde el paradigma de las anomalías espectrales, utilizando la familia de algoritmos RX y de Detección de Blancos, para clasificación de píxeles en una imagen de alta resolución multiespectral. El procesamiento de la información implicado, inicialmente, tomar muestras de referencias asociadas a infraestructura militar. Los resultados de cada análisis han sido depurados y recalibrados estableciendo parámetros para acotarlos y redefinir zonas. Los datos de salida han sido combinados y contrastados, lo cual nos ha permitido elaborar una cartografía con subzonas (39) de probable presencia de REG, a las cuales se les a realizado un *buffer* (zona de influencia) de 25 m, sobre grupo de anomalías espectrales. Considerando la accesibilidad, se tomaron 5 subzonas para ser analizadas en terreno.

## Abstract

*Since the launch of Sentinel 1 in April 2014, the European programme The present work aims to contribute to the development of a methodological strategy with remote sensing tools to identify areas with the presence of explosive remnants of war (ERW). For this purpose, analyses were carried out from the paradigm of spectral anomalies, using the RX and Target Detection family of algorithms for pixel classification in a high-resolution multispectral image. The processing of the information involved, initially, taking reference samples associated with military infrastructure. The results of each analysis were refined and recalibrated, establishing parameters to narrow them down and redefine zones. The output data were combined and contrasted, which allowed us to elaborate a cartography with sub-zones (39) of probable ERW presence, to which a buffer (influence area) of 25 m was projected, on a group of spectral anomalies. Considering the accessibility, 5 sub-zones were taken to be analyzed in the field.*

<sup>(1)</sup>El presente artículo expone los resultados de la investigación de Tesis de grado presentada por Gonzalo Escobar A. y Erika Villamil P., en conformidad con los requisitos para obtener el grado de Magíster en Geomática de la Universidad de Santiago de Chile el año 2016.

**Palabras clave:** Explosivos remanentes de Guerra, Anomalías espectrales, Algoritmo RX, Detección de blancos.

**Keyword:** Explosive remnants of War, Spectral anomalies, Rx algorithm, Target detection.

Universidad de Santiago de Chile  
[gonzaloescobarbd@gmail.com](mailto:gonzaloescobarbd@gmail.com)

Recepción 30/04/2021  
Aprobación 17/05/2021

## 1. INTRODUCCIÓN

El asunto de las REG<sup>1</sup> resulta ser un problema complejo de alcance mundial, pues en muchos países, las municiones y los artefactos explosivos abandonados y sin detonar son una amenaza para la seguridad de las personas. Aquí se incluyen las bombas, los morteros, los misiles u otros artefactos que no estallan al instante, pero permanecen en estado volátil y pueden ser mortales si son tocados o removidos. Esto adquiere trascendencia si consideramos que puede asegurarse que el número total de municiones sin estallar en todo el mundo supera el de las minas terrestres.

Para enfrentar esta situación se han desarrollado múltiples métodos asociados a la detección de metales (dominio de frecuencia, dominio en tiempo y VLF) y también a técnicas de clasificación de patrones (lógica difusa y redes neuronales). Paralelamente, se han diseñado métodos utilizando animales (perros, ratas, abejas, etc.), y técnicas de radar y sensores espectrales. Respecto a este último método, es constatable el aumento en investigación y el desarrollo de proyectos que han derivado en óptimos resultados, sobre todos aquellos que se refuerzan con datos de otro tipo de sensores.

De forma paralela, en las últimas décadas algunos investigadores han desarrollado esfuerzos para tratar el tema de las anomalías espectrales. Una serie de enfoques han definido esta técnica de análisis, desde métodos de clasificación supervisados rígidos hasta algoritmos de clasificación específica, no supervisados que buscan identificar puntos de anomalía. Su orientación hacia la resolución de problema de los restos de explosivos de guerra es relativamente nueva y por lo general utilizada en el tratamiento de imágenes hiperespectrales. En relación con lo anterior es fundamental destacar que uno de los elementos en común a casi todos los algoritmos de clasificación de anomalías radica en el hecho de concebirlas en una lógica de representación de distribución normal multivariante o gaussiana.

Los trabajos de Witherspoon y Holloway (1995), C. I. Chang y S. S. Chiang (2001), Liao, Chen & Baertlein (2001),

A. P. Schaum, and A. D. Stocker (2002), D. W. J. Stein, S. G. Beaven, L. E. Hoff, E. M. Winter (2002), Qiandong Guo, Bing Zhag, Qiong Ran, Lianru Gao y Antonio Plaza (2014) han sido pioneros en esta materia desarrollando la línea investigativa abierta por Red y X. Yu, quienes desarrollaron el algoritmo RX, denominado así por las iniciales de los nombres de sus creadores. Su objetivo es la identificación de diferencias espectrales respecto al fondo de la imagen.

Otro enfoque en el estudio de las anomalías espectrales ha sido la denominada «detección de blancos supervisada». Esta metodología se basa en la premisa de que las características espectrales de destino se definen generalmente por la definición de un solo espectro objetivo (píxel o polígono) o un subespacio objetivo. Similar a las técnicas de entrenamiento, la detección de blancos opera a partir de la definición de muestras (objetivo) cuyo comportamiento espectral es identificado en la imagen (H. Ren y C.-I Chang, 2000; D. Manolakis, D. Marden y GA Shaw, 2003). Una serie de trabajos que han profundizado en el rendimiento de los distintos algoritmos de detección de blancos y realizando comparaciones entre estos (A. Camacho, C. Vargas, H. Argueyo, 2016; Q- Guo, R. Pu, J. Cheng, 2016; M. Fahad, M. Hy, Y Zhang, 2017).

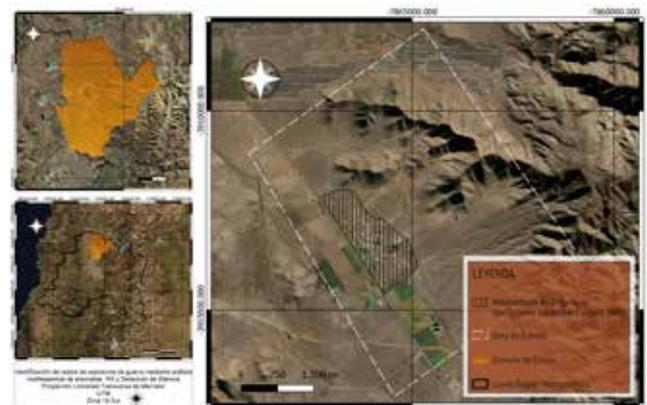
La presente investigación busca obtener resultados óptimos utilizando una imagen multispectral de alta resolución definiendo parámetros específicos para la identificación de REG en la zona de estudio.

## 2. MATERIAL Y MÉTODO

### 2.1 Zona de estudio

Nuestro estudio se desarrolló en la localidad de Peldehue al norte de la comuna de Colina. Esta comuna está localizada en el sector noreste de la Región Metropolitana (Figura N°1), a 14 km al norte de Santiago (centro). Pertenece a la provincia de Chacabuco, y es la capital Provincial. Ella se encuentra delimitada por las latitudes 32° 21 minutos y 32° 57 minutos Sur, y por las longitudes 70° 24 minutos y 70° 10

<sup>1</sup>Los explosivos remanentes de guerra corresponden al conjunto de artefactos explosivos como bombetas de racimo, proyectiles de artillería, morteros, etc., que no explotan con éxito o que, por diversas razones quedan emplazados en terreno, siendo potencial su estallido. Las REG se agrupan, por tanto en dos grandes categorías: AXO y UXO. Axo es la abreviación de *Abandoned Explosive Ordnance* (Artefactos explosivos abandonados), es decir los artefactos explosivos que no se han utilizado durante un conflicto armado, que han sido abandonados o desechados por una parte en un conflicto armado y que ya no están bajo el control del partido que los dejó atrás o los tiró. Artefactos explosivos abandonados que pueden o no haber sido cebado, fusionado, armados o preparados de otro modo para el uso. Por su parte, UXO es la sigla abreviada de *Unexploded Ordnance* (Artefactos sin explotar), que se refiere a cualquier artefacto explosivo que se ha cebado, fusionado, armado o preparado de otra forma o utilizado. Puede haber sido disparado, dejado caer, lanzado o proyectado, aún permanece sin explotar debido a un mal funcionamiento, diseño o por cualquier otra razón.



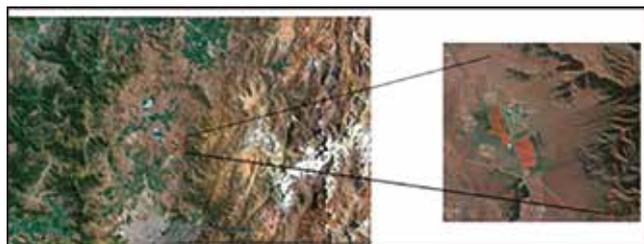


Figura 2. Instalaciones de la Brigada de Operaciones Especiales Lautaro

minutos Oeste. Para el desarrollo de nuestra investigación se ha definido un área de 25 km<sup>2</sup>, correspondientes a un sector de la localidad de Peldehue en el cual se encuentran emplazadas las instalaciones de la Brigada de Operaciones Especiales Lautaro del Ejército de Chile (Figura N°2).

La Brigada de Operaciones Especiales Lautaro (BOE) es un complejo orgánico militar integrado por 11 unidades, y fue fundada el año 2008. Localizado en el conocido ex fuerte Arteaga, la zona en donde se encuentra emplazada la brigada se caracteriza por ser históricamente un lugar en el cual se han desarrollado ejercicios y maniobras de las diferentes unidades del ejército. Año tras año son entrenadas las fuerzas de élite del ejército de Chile. Según las indagaciones, durante los últimos 5 años en este lugar se habría utilizado armamento de infantería (Mortero 60 mm y 81 mm) y artillería.

### 2.2 Sistema Pléiades

Para el desarrollo de este trabajo se ha optado por trabajar con una imagen de alta resolución Pléiades del

15 de enero del año 2015. El sistema Pléiades suministra productos ópticos de muy alta resolución en un tiempo récord, con capacidad de revisita diaria sobre cualquier punto del planeta para dar mejor respuesta a los requisitos tanto civiles como militares.

Se basa en satélites más pequeños, más baratos y ágiles que sus predecesores. Los dos satélites Pléiades se situarán sobre una órbita en fase con SPOT 6 y 7, los sucesores de SPOT 5. La constelación de los cuatro satélites ofrecerá una combinación ideal de detalle y cobertura, cuya plataforma está actualmente en activo en casi todos los programas europeos de observación de órbita baja (entre otros, ERS, Envisat, MetOp y Helios). Pléiades integra tecnología innovadora, como los actuadores giroscópicos, por ejemplo, que por primera vez en Europa llevarán los satélites de este programa para proporcionar unas prestaciones sin precedentes.

Los dos satélites Pléiades forman el componente óptico del sistema de observación francoitaliano de doble uso civil/militar Orfeo (Italia aporta el componente radar Cosmo-Skymed). El programa se está desarrollando bajo la responsabilidad de la agencia espacial francesa, CNES. Airbus Defence and Space es el contratista principal para el diseño, desarrollo, construcción y suministro de los dos satélites (<http://www.geo-airbusds.com>).

### 2.3 Metodología

El desarrollo de nuestra investigación apunta a diseñar

Tabla N°1. Pléiades. Características técnicas.

PLÉIADES 1A - 1B					
Bandas	1	2	3	4	5
Resolución espacial	2 m	2 m	2 m	2 m	0,50 cm
Resolución espectral (nm)	590	500	430	740	470
	710	620	550	940	830
	RED	GREEN	BLUE	IR Cercano	Pancromat
Resolución radiométrica	12 bits/píxel				
Ancho de barrido	20 km				
Tamaño de escena	100 x 100 km				
Pares estéreo	SI				
Revisita	DIARIA				
Programable	SI				
Altitud	694 km				
Formato de entrega	GeoTIFF o TIFF				
Lanzamiento	Pléiades 1A : diciembre 2011 - Pléiades 1B: diciembre 2012				

una estrategia analítica que permita disminuir el tiempo en el proceso de identificación de áreas peligrosas confirmadas (CHA)<sup>2</sup> y áreas peligrosas definidas (DHA), que pueda ser aplicable a diferentes contextos geográficos, sobre todo en aquellos lugares que dada las características de sus suelos o su vegetación presenten grados de visibilidad propicios para detectar los restos de explosivo mediante análisis multiespectral. En este sentido nuestro proyecto se insertaría dentro de lo que se denomina, en el glosario técnico definido por las directrices internacionales de desminado (International Mine Action Standards-IMAS), como Estudio Técnico.

Tomando como base a lo anterior se ha trabajado a partir de cadenas de procesamiento de información multiespectral divididas en 5 etapas: corrección radiométrica; corrección geométrica; extracción de características y conformación de muestras; análisis RX, y análisis detección de blancos.

Para los propósitos de nuestra investigación definimos siete clases: suelo desnudo, espinos, zinc, metal 1, metal 2, asfalto desgastado y pastizal. Para la realización de anomalías espectrales se comenzó aplicando los algoritmos RXD, UTD y su variante híbrida RXD-UTD. La familia de algoritmos RX se expresan de la siguiente forma:

$$\delta_{RXD}(r) = (r - \mu)^T K_{L \times L}^{-1} (r - \mu)$$

$$\delta_{UTD}(r) = (I - \mu)^T K^{-1} (r - \mu)$$

$$\delta_{RXD-UTD}(r) = (r - 1)^T K_{L \times L}^{-1} (r - \mu)$$

Los resultados de la aplicación de los algoritmos RX permiten deducir que tanto su RXD como su variable RXD-UTD no expresan variaciones significativas. Sin embargo, el comportamiento del análisis de anomalías aplicado con UTD da cuenta de una variación significativa, en relación con los otros clasificadores.

De esta manera se calcularon patrones de agrupamiento de píxeles (i-moran - getis-ord g) y zonas calientes (c de geary) definidas por una alta variabilidad entre el valor de un píxel y los datos circundantes. Una característica

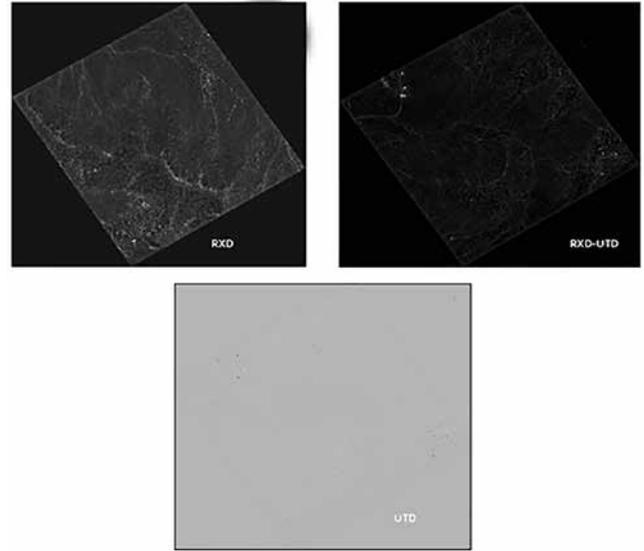


Figura 3. Resultado aplicación de los tres índices de clasificación.

común a todas las clasificaciones preliminares es que, en mayor o menor medida, según el parámetro de clasificación, los resultados del análisis de anomalías mostraron algún grado de heterogeneidad presentándose valores diferentes a los de fondo en distintos rangos espectrales. Aun así, UTD se perfiló como el mejor algoritmo de clasificación. Es posible presumir que esta variabilidad se debe a la presencia de elementos de distinto material respecto del «valor suelo» como así también a «anomalías de fondo», es decir valores que siendo suelo se encuentran alterados por alguna condición en particular que lo diferencia del resto de los píxeles agrupados en esta categoría como humedad y/o sequedad, sombras, vegetación enfermiza, rocas aisladas, huellas de explosión, etc.

Para afinar la definición de anomalías se procedió a realizar un análisis de detección de blancos utilizando distintos métodos: *Matched filtering (MF)*; *Constrained Energy Minimization (CEM)*; *Adaptive Coherence Estimation (ACE)* y *Spectral Angle Mapper (SAM)* y *Orthogonal Subspace Projection (OSP)*. Los algoritmos de clasificación de detección de blancos se expresan:

$$D_{MF}(x) = \frac{(d - \mu)^T \Gamma^{-1} (x - \mu)}{(d - \mu)^T \Gamma^{-1} (d - \mu)}$$

$$D_{CEM}(x) = \frac{d^T \Gamma^{-1} x}{d^T \Gamma^{-1} d}$$

$$D_{ACE}(x) = \frac{(d^T \Gamma^{-1} x)^2}{(d^T \Gamma^{-1} d)(x^T \Gamma^{-1} x)}$$

$$D_{SAM}(x) = \frac{d^T x}{(d^T d)^{\frac{1}{2}} (x^T x)^{\frac{1}{2}}}$$

$$D_{OSP}(x) = \frac{d^T P_U^\perp x}{d^T P_U^\perp d}$$

<sup>2</sup>El IMAS 08.21 define a los estudios no técnicos como investigaciones de áreas peligrosas existentes o previamente registradas, siendo, por tanto, el punto de partida para el registro de las áreas peligrosas confirmadas (CHA) o áreas peligrosas sospechosas (SHA). Un área peligrosa sospechosa (SHA) se refiere a un área sospechosa de tener peligro de minas/REG. Un SHA puede ser identificado por medio de un estudio de impacto, otra forma de estudio nacional, o por la denuncia de la presencia de peligros explosivos. Por su parte el término Área Peligrosa Confirmada (CHA) se refiere a un área identificada por un estudio no técnico en el cual, la necesidad de una posterior intervención a través de un estudio técnico o de despeje ha sido confirmada. Por su parte el término área peligrosa definida (DHA) hace referencia a un área, generalmente dentro de un CHA que requiere de un despeje completo. Una DHA normalmente es identificada a través de un minucioso estudio.

Para la ejecución del análisis de detección de blancos se definieron valores de fondo que son aquellos que serán sustraídos dentro del proceso de clasificación a fin de afinar los blancos definidos. A cada clasificador se le aplicó **Fración Mínima de Ruido (MNF)**.

Posteriormente se realizó la conversión de estos datos de anomalías a formato ráster, los cuales fueron agrupados a partir de la superposición de los resultados por cada método, conservando los valores coincidentes de los diferentes procesos que se realizaron por cada uno de ellos, incluyendo los resultados de la cadena de procesamiento en UTD.

A partir de estos puntos medios, procedimos a generar un *buffer* de 25 m, considerados como el área de influencia, donde potencialmente podríamos encontrar los objetos y materiales que constituían las anomalías detectadas, esto estimando el error geométrico que podría tener nuestra georreferenciación. Esto dio origen a 39 zonas anómalas, de las cuales constatamos 5 en terreno. Por último, en esta etapa, decidimos unir todos los resultados de las diferentes metodologías, para así definir una gran zona con anomalías. Como resultado elaboramos el siguiente mapa (Figura N° 5) con su respectivo listado de coordenadas, con el cual verificaríamos los datos en terreno.

Estos datos fueron comparados con el análisis UTD. Es

Tabla 2. Blancos para la aplicación de análisis de detección

Target	Definición
Metal 1 (Vehículo Militar)	Vehículo Militar 3m x 2m completo de metal (Fierro)
Metal 2 (garita)	Garita Militar de Metal 2m x 2m
Techos	Techos de Zinc infraestructura Militar
Cemento	Helipuerto Unidad Militar

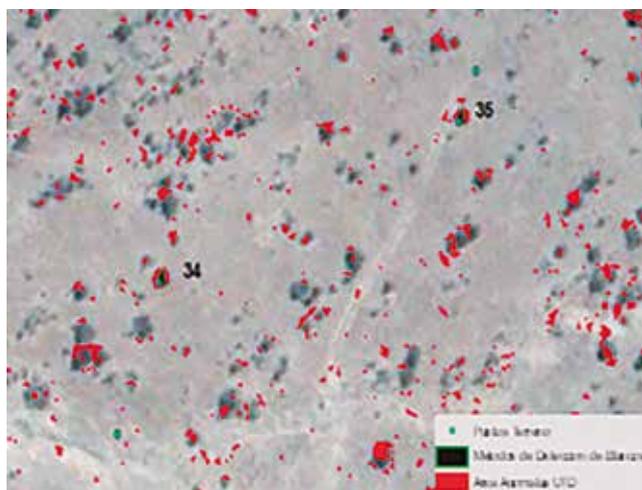


Figura 4. UTD-Detección de Blancos y puntos de Terreno Sub-zona 34-35.

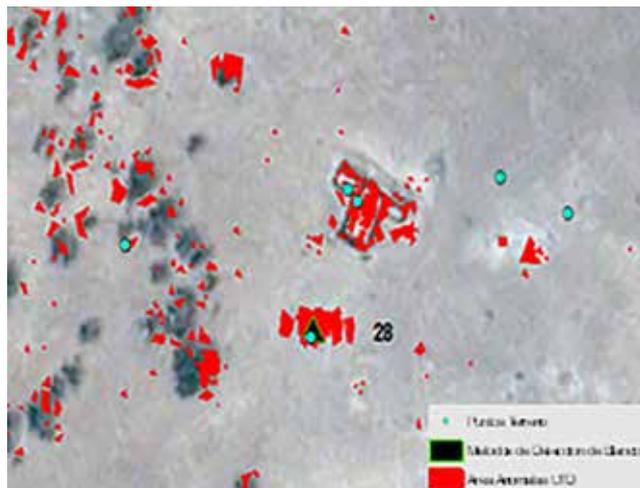


Figura 5. UTD-Detección de Blancos y puntos de Terreno Sub-zona 28.

importante destacar en ese sentido que existieron claras coincidencias en la detección de anomalías, sin embargo, creemos que el algoritmo UTD presenta un gran margen de ruido como consecuencia de la detección de suelo contaminado con material metálico.

Así y tomando como base criterios de accesibilidad se seleccionaron 5 subzonas para ser estudiadas en terreno:

1. Subzona 28
2. Subzona 29
3. Subzona 30
4. Subzona 34
5. Subzona 35



Figura 6. Distribución de anomalías espectrales y definición de buffer

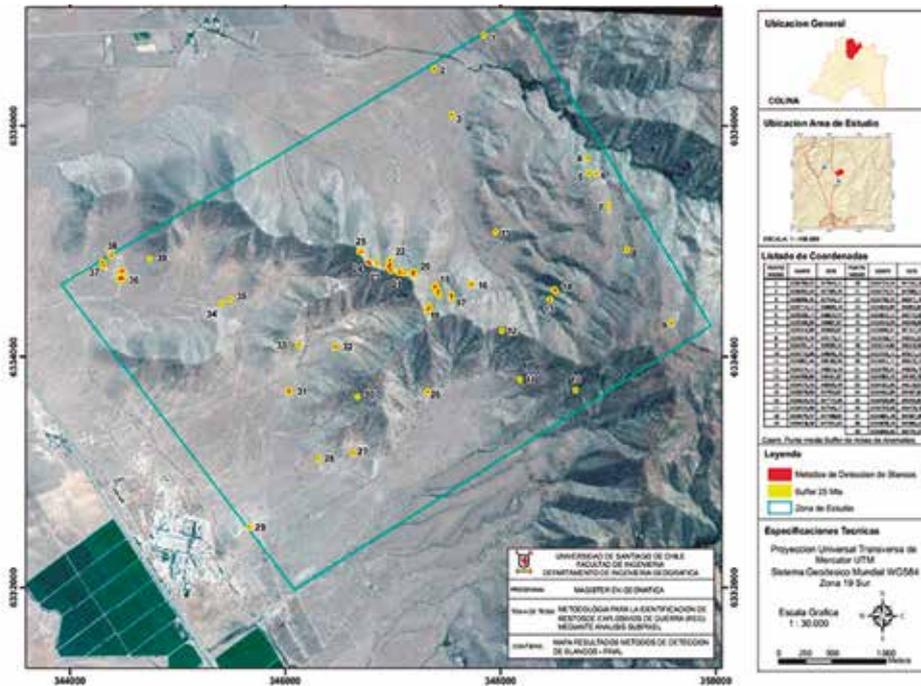


Figura 7. Métodos de Detección de Blancos - Mapa de Resultados Final.

Tabla 3. Métodos de Detección de Blancos - Coordenadas Finales

PUNTO MEDIO	NORTE	ESTE	PUNTO MEDIO	NORTE	ESTE
1	6336783,55	347844,11	20	6334724,34	347192,18
2	6336492,44	347385,45	21	6334725,51	347080,11
3	6336096,35	347544,27	22	6334790,25	346971,76
4	6335714,12	348809,10	23	6334810,89	346853,87
5	6335590,17	348815,57	24	6334815,12	346774,00
6	6335580,89	348887,87	25	6334910,09	346698,86
7	6335310,89	349003,87	26	6333696,91	347322,35
8	6334924,39	349179,21	27	6333168,27	346632,02
9	6334291,21	349585,42	28	6333114,86	346310,60
10	6333710,80	348696,70	29	6332526,12	345671,10
11	6333802,46	348180,90	30	6333652,71	346670,25
12	6334224,12	348013,10	31	6333700,32	346036,76
13	6334498,89	348461,87	32	6334083,43	346465,58
14	6334575,43	348505,49	33	6334101,06	346128,91
15	6335078,89	347953,87	34	6334462,89	345407,87
16	6334626,43	347725,96	35	6334500,89	345493,87
17	6334524,80	347546,27	36	6334703,68	344478,18
18	6334579,47	347408,82	37	6334802,18	344307,06
19	6334418,30	347331,62	38	6334878,10	344384,22
			39	6334846,66	344745,32

En cada subzona se procedió a realizar un rastreo en torno a los 25 metros de *buffer* definidos.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1. Subzona 29. Garita

En la subzona 29 localizamos una garita de guardia militar, similar a la que dio origen al *target* nº1. Las coordenadas que determinamos a partir del análisis de detección de blancos emplazó a solo 2,82 m aproximados, del punto medio del área anómala que habíamos definido.

#### 3.2 Sub-Zona 28. Blanco de Barril

Dentro del área determinada como anómala nº 28 (subzona) localizamos un blanco de barril metálico, a solo 1,045 m aproximados de su punto medio. Adicionalmente dentro del área del *buffer* de influencia encontramos 2 blancos de barril dentro de un compartimento de madera de almacenamiento de materiales de polígono. Además, cerca de este lugar encontramos 3 elementos más, asociados a munición y metal, que decidimos registrar para nuestro proyecto.

#### 3.3 Subzona 30. Explosivos remanentes de guerra (REG)

La subzona 30 arrojó excelentes resultados. En su perímetro encontramos de explosivos remanentes de guerra dentro a una distancia aproximada de 6,58 m del punto medio. Adicionalmente encontramos 6 artefactos explosivos adyacentes al área de influencia. Para esta zona es muy importante resaltar el hecho de que su relieve se caracteriza por tener fuerte pendiente (30° aprox.), por lo tanto, la probabilidad de que estos artefactos se desplacen es muy alta.

#### 3.4 Subzonas 34 y 35. Restos de explosivos y blanco de barril

En el punto 34, encontramos restos de explosivos fuera del área de influencia, aproximadamente a 39 m del punto medio del área considerada anómala. La subzona 35 contenía un blanco de barril dentro de su área de influencia, aproximadamente a

Tabla N°4. Coordenadas punto 29, plano vs terreno

Punto Anomalía	Norte (WGS84)	Este (WGS84)	Distancia
29 – Plano	6332526,12	345671,10	2,82 m aprox.
29 – Terreno	6332524,00	345669,00	

Tabla N° 5. Coordenadas punto 28, plano vs terreno

Punto Anomalía	Norte (WGS84)	Este (WGS84)	Distancia
28 – Plano	6333114,85	346310,59	1,04 m aprox.
28 – Terreno	6333114,00	346310,00	
Punto 1	6333129	346271	
Punto 2	6333138	346318	
Punto 3	6333136	346320	
Punto 4	6333140	346350	
Punto 5	6333134	346364	



Figura 8. Punto 29. Garita.

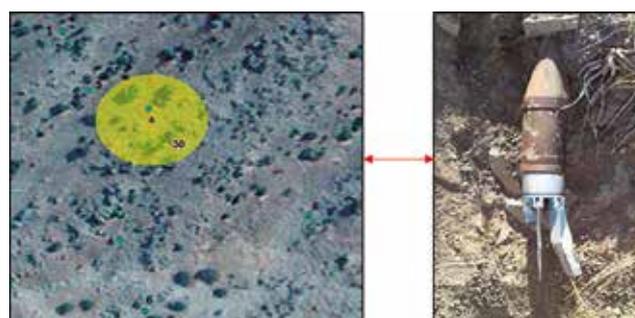


Figura 11. Subzona 30. Explosivos remanentes de guerra.

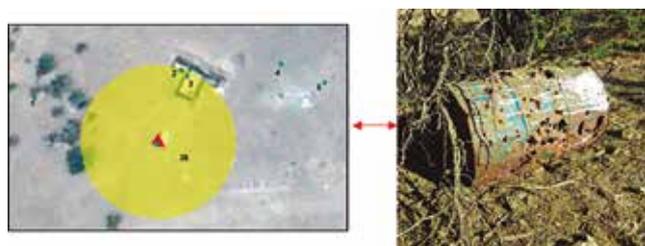


Figura 9. Punto 28. Blanco de barril

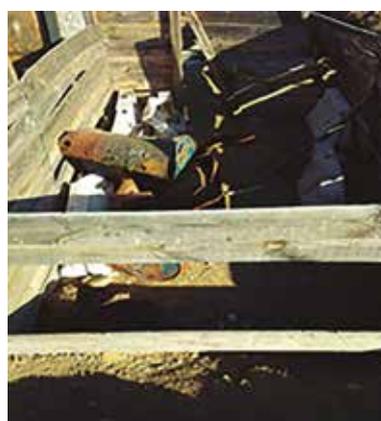


Figura 10. Almacén de blancos de barril.

11 m del punto medio. Debemos resaltar que estas áreas son cercanas a un sendero del recinto, por tanto, resulta ser una zona frecuentemente transitada, razón por la probabilidad de que estas entidades hayan sido desplazadas es muy alta.

Al finalizar con la comprobación de datos en terreno, quedamos muy satisfechos con los resultados, dado que en todas las subzonas en las cuales se exploró, localizamos algún tipo de elemento metálico asociado a material bélico. Además, casi todos estaban dentro del rango de zona de influencia preestablecida con el buffer de 25 m.

Todas las zonas revisadas pudieron ser confirmadas con la presencia de material metálico que varió desde 1 m hasta 50 cm de longitud. El material identificado por la combinación de métodos fueron barriles metálicos, morteros 60 mm, granadas explotadas y munición sin estallar de artillería. Considerando que el material abandonado también es parte de nuestro trabajo, es posible homologar, desde el punto de vista del desafío técnico, tanto lo barriles como los explosivos detonados como un buen resultado, pues

Tabla N° 6. Coordenadas punto 30, plano vs terreno

Punto Anomalía	Norte (WGS84)	Este (WGS84)	Distancia
30 – Plano	6333652,54	346670,31	6,58 m aprox.
30 – Terreno	6333659,00	346669,00	
Punto 1	6333701	346630	
Punto 2	6333696	346632	
Punto 3	6333669	346642	
Punto 4	6333587	346656	
Punto 5	6333601	346740	
Punto 6	6333548	346667	

Tabla N° 7. Coordenadas punto 34 y 35, plano vs terreno

Punto Anomalía	Norte (WGS84)	Este (WGS84)	Distancia
34 – Plano	6334462,88	345407,86	39,06 m aprox.
34 – Terreno	6334426,00	345395,00	
35 – Plano	6334500,88	345493,86	11,85 mts aprox.
35 – Terreno	6334512,00	345498,00	

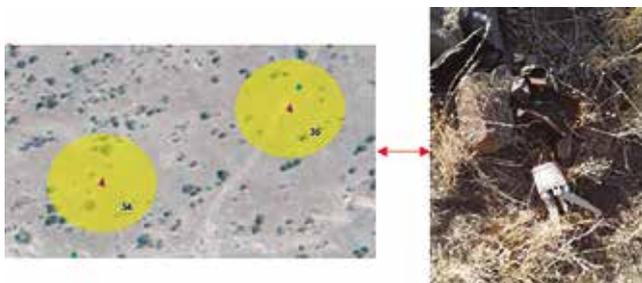


Figura 12. Subzona 34, explosivos remanentes de guerra.



Figura 15. Determinación de Áreas DHA, basado en resultados de campo.

Figura 16. Áreas DHA y CHA.

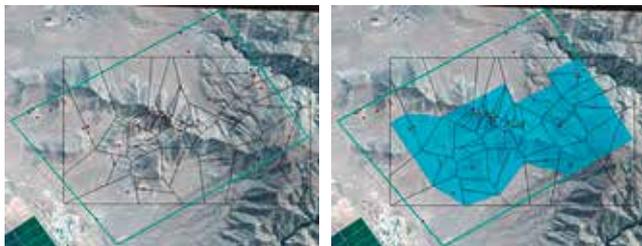


Figura 13. Polígonos de Thiessen, a partir de áreas anómalas.

Figura 14. Determinación de Área CHA, a partir de Polígonos de Thiessen.

perfectamente se podrían tratar de contenedores de armamento y explosivos o indicios de la presencia de REG, en la medida que el material explosado siempre nos permitirá esbozar inicialmente una zona sospechosa.

A partir de estos resultados desarrollamos un proceso de zonificación con el fin de establecer las zonas CHA. Para

ello se procedió a la generación polígonos de Thiessen, lo cual permite delimitar perímetros de polígonos a partir del cálculo de equidistancia respecto a los puntos vecinos, designando una zonificación pertinente para nuestro objetivo. Es importante destacar que para ello ignoramos los puntos medios de los polígonos finales de la metodología de detección de blancos, 1, 2, 3, 29, 36, 37, 38 y 39, dado que estos señalan clases conocidas como techos de edificaciones y por tanto solo interferirían en la determinación de la CHA.

Teniendo esta zona definida, y con los resultados de la corroboración en terreno, procedemos a determinar nuestras zonas DHA. Cabe destacar que no se incluirá la subzona 29, dado que incluye una garita. De esta forma los resultados fueron los siguientes:

Así se obtuvieron las siguientes áreas: Área Total DHA: 55,35 ha; Área Total CHA: 776,56 Ha; Área de Estudio: 1548,09 Ha.

## DISCUSIÓN

Previo a la realización de este estudio cabía la posibilidad de encontrar restos de explosivos de guerra sin estallar (REG), pues se trata de una zona que hace más de 3 décadas ha sido el escenario de ejercicios militares. Según la recopilación de antecedentes, la munición que se podía encontrar era de mortero 60 mm y 81 mm, antitanque de diversos calibres, artillería 84 mm y granadas de mano. No era probable que se encontraran vestigios de pólvora, pues en la zona se realizan ejercicios de lanzamiento de mortero que no sobrepasa los 1 000 metros de distancia, razón por la cual no era necesaria la utilización de cargas de proyección. La exploración en terreno arrojó la presencia, precisamente de todo este tipo de munición, en la cual podríamos integrar los blancos barril que podrían perfectamente haber sido contenedores de armamento.

Si consideramos los blancos barriles como aciertos, en la medida que en otros escenarios de combate real esto podría ser un contenedor de explosivos, podemos afirmar que la zona se caracteriza por presentar bajos niveles de contaminación metálica. De todas formas, un elemento a considerar es una cantidad considerable de desecho de casquillos de balas de diverso calibre, proveniente de la utilización de munición de fusil en la zona como consecuencia de los constantes ejercicios de combate de las fuerzas especiales en el área. Es necesario evaluar el comportamiento espectral de zonas con casquillos a fin de reducir los falsos positivos.

Nuestra investigación arrojó 39 subzonas en las que se presentaron anomalías espectrales. Como ya explicábamos, por razones de accesibilidad solo se pudieron evaluar 5 de ellas las cuales presentaron material metálico de diverso origen. Desde el punto de vista de los riesgos, nuestro estudio establece que si bien se trata de un campo militar, la presencia de armamento sin estallar, constituye un serio peligro para las tropas que ahí se asientan, pues en primer término, las entidades explosivas halladas se encuentran a poca distancia de los edificios del recinto y además se presentan en zonas donde las unidades realizan sus maniobras de entrenamiento, lo cual aumenta el riesgo.

Por otro, lado, pese a que las restantes zonas se encuentran alejadas de las unidades militares y de áreas habitadas, es sabido que estos lugares son constantemente explorados por aficionados al andinismo y por lugareños, lo cual constituye un problema que, si bien no es alarmante, resulta ser bastante preocupante. El año 2000, dos jóvenes resultaron heridos como consecuencia de la manipulación de un artefacto explosivo sin estallar dentro de los terrenos militares de Peldehue. Asimismo, el año 2003 un civil resultó fallecido como consecuencia de la manipulación de estos artefactos.

En síntesis, nuestra investigación logro establecer la presencia de REG a partir de análisis multiespectral en base a RX y detección de blancos. El grado de efectividad de la metodología aquí propuesta deberá ser definido a partir de la exploración de todas las subzonas delimitadas. De todas formas, si consideramos el universo del total de subzonas exploradas, nuestra tasa de acierto es del 70 %, lo cual resulta alentador considerando los recursos con los que se trabajó, así como también un acceso condicionado a la zona de estudio, dado por el carácter de zona militar restringida y por sus condiciones geomorfológicas.

## CONCLUSIONES

Se logró demostrar que es posible detectar explosivos remanentes de guerra utilizando datos multiespectrales, permitiendo acotar las zonas de exploración para el despeje y disminuir los gastos asociados a ello.

Es necesario profundizar en un diagnóstico comparativo de todos los algoritmos utilizando todas las variables de calibración posibles a fin de conseguir la combinatoria de clasificación que ofrezca el mayor rendimiento. Si bien nuestra cadena de procesamiento espectral entregó óptimos resultados es prioritario averiguar si existen otras calibraciones que los mejoren. En segundo lugar, creemos que es necesario elaborar nuevas estrategias de análisis basadas en clasificaciones blandas de subpíxel, pues algunos estudios han develado su potencialidad, lo cual no alcanzamos a comprobar acá.

Se debe experimentar con la utilización de datos provenientes de otros sensores de alta resolución, como así también profundizar en el estudio por bandas individuales, analizando el comportamiento de las anomalías en cada una de ellas.

## AGRADECIMIENTOS

Agradecemos el apoyo y la colaboración del Profesor Carlos Eissmann, quien oriento el enfoque de esta investigación y cuyas gestiones posibilitaron su desarrollo. Asimismo doy las gracias a todos los docentes del programa de Geomática de la USACH. Agradecemos también apoyo de los oficiales de la Brigada de Operaciones Especiales quienes nos brindaron gentilmente su apoyo el día de nuestra investigación. Hacemos una mención de agradecimiento especial a la empresa AIRBUS Defense y Space, en específico a Alejandra González su representante para Latinoamérica, quienes aportaron la imagen Pléiades para poder desarrollar nuestro proyecto.

## BIBLIOGRAFÍA

- Auborn, John E. y Fuller, Jr James. (1993). Target detection by co-occurrence matrix segmentation and its hardware implementation. *SPIE Digital Library* 32(11): 2698.
- Carr, I., Fletcher I., Holland P., Leonelli J., Mcpherrin D., y Althouse M. (1990). Characterization of filtered FLIR systems designed for chemical vapor detection and mapping. [en línea] *SPIE Digital Library*. Disponible en: <<http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?articleid=944819>> [fecha de consulta: 20 febrero 2016]
- Chang, C., Chen, K., Wang, J. y Althouse, Mark L. G. (1994). A relative entropy-based approach to image thresholding. *Pattern Recognition Letters* 27(9): 1275-1289.
- Chiang, Shao-Shan. y Chang, Chein-I. (2001). Discrimination Measures for Target Classification. *Remote Sensing Signal and Image Processing Laboratory*.
- Guo, Q., Bing, Z., Ran, Q., Gao, L., Li, J. y Plaza, A. (2014). Weighted-RXD and Linear Filter-Based RXD: Improving Background Statistics Estimation for Anomaly Detection in Hyperspectral Imagery. *IEEE Journal of selected Topics in applied earth Observations and remote sensing* 7(6).
- Harsanyi, J.C. y Chang, C. (1994). Hyperspectral image classification and dimensionality reduction: an orthogonal subspace projection approach. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 32(4): 779-785.
- IMAS 5.10. Gestión de Información para Acción Contra Minas. [en línea]. Disponible en: <<http://www.mineactionstandards.org/fileadmin/MAS/documents/imas-nternational-standards/spanish/IMAS-05-10-Ed1-Amd1-sp.pdf>> [fecha de consulta: 27 septiembre 2015]
- Liao, W., Chen, D. y Baertlein, B.A. (2001). Detection and remediation technologies for mines and minelike targets, *Spie* no. VI, Orlando, USA.
- Manolakis, D., Marden, D. y Shaw, G. A. (2003). Procesamiento de imágenes hiperespectrales para aplicaciones de detección automática de objetivos, *Lincoln Laboratory Journal* 14: 79-116.
- Monitor. Monitoring progress in eliminating landmines, cluster munitions, and other explosive remnants of war. [en línea]. Disponible en: <<http://www.the-monitor.org/en-gb/home.aspx>> [fecha de consulta: 20 Abril 2015]
- Reed, I.S. y Yu, X. (1990). Adaptive multiple-band CFAR detection of an optical pattern with unknown spectral distribution. *IEEE Trans. Acoust. Speech Signal Process* 38: 1760-1770.
- Rejas Ayuga, J., Martínez Marín, R., Bonatti, J., Martínez-Frías, J. y Marchamalo Sacristán, M. (2015). Detección de anomalías mediante espectrometría de imagen en la cordillera volcánica central de Costa Rica. Implicaciones en la exploración planetaria. *Rev. Ciencias Espaciales* 8(2): 272-286.
- Ren, H y Chang, C. (2000). Enfoque minimizado por interferencia con restricción de objetivo para la detección de objetivo de subpíxeles para imágenes hiperespectrales. *Optical Engineering* 39(12): 3138-3145.
- Sahoo, P.K, Soltani, S. y Wong, A. K. C. (1988). A survey of thresholding techniques. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing* 41(2): 233-260.
- Sanderson, H. (1995). Image segmentation for compression of images and image sequences. *IEE Proceedings - Vision, Image, and Signal Processing* 142(1): 15-21.
- Sanz, C. (2002). Un Método de Clasificación aplicado al Análisis de Imágenes Hiperespectrales. Tesis Doctoral Razonamiento Evidencial Dinámico. Universidad Nacional de la Plata, Facultad de Ciencias Exactas.
- Schaum, A. y Stocker, Alan (2004). *Advanced Algorithms for Autonomous Hyperspectral Change Detection*.
- Stein, D., Beaven, S., Hoff, L., Winter, E., Shaum, A. y Stocker, A. (2002). Anomaly Detection from hiperespectral Imagery. *EEE Signal Processing Magazine* 19: 58-69.
- Witherspoon, N. H., Holloway, J. H., Davis Kenn S., Miller, R. W. y Dubey, A. C. (1995). The Coastal Battlefield Reconnaissance and Analysis (COBRA) Program for Minefield Detection. *Spiel* 2496: 500-507
- Zhang, J., Chen C., Xiang Y., Zhou w. y Vasilakos, A. (2013). An Effective Network Traffic Classification Method with Unknown Flow Detection. *IEEE Transactions on Network and Service Management* 10(2): 133-147.
- Camacho, A., Vargas, C. y Argueyo, H. (2016). Un estudio comparativo de algoritmos de detección de objetivos en imágenes hiperespectrales aplicados a cultivos agrícolas en Colombia. *Tecnura* 49(20): 86-99.
- Guo, Q., Pu, R. , Cheng, J. (2016). Anomaly Detection from Hyperspectral Remote Sensing Imagery. *Geosciencias* 56 (6):
- Fahad, M. Hy, M., Zhang, Y. (2016). Combination of CEM & RXD for target detection in hyperspectral images. *Workshop on Hyperspectral Image and Signal Processing: Evolution in Remote Sensing (WHISPERS)*. 2016 8th

### Sobre el autor

#### Gonzalo Escobar Arévalo

Licenciado en Historia, Magister en Geomática. Universidad de Santiago de Chile (USACH). Profesional Geoanalista en USACH asociado a proyectos de investigación Fondecyt de análisis de evolución urbana, minera e industrial.